

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА НУКЛОТРОНЕ РЕЖИМОВ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЬНО-КОЛЛАЙДЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

*О. И. Бровка, А. В. Бутенко, А. Ю. Гребенцов, А. В. Елисеев¹,
И. Н. Мешков, А. Л. Светов, А. О. Сидорин, В. М. Слепнев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Комплекс NICA включает в себя два синхротрона — бустер и нуклотрон, служащих для ускорения частиц до энергии эксперимента, и собственно коллайдер. Тяжелоионная программа комплекса NICA рассчитана на эксперименты с ионами вплоть до Au^{+79} . Программа с поляризованными легкими частицами включает в себя эксперименты с дейтерием и протонами. Необходимость группировки свободно циркулирующего в ионной камере пучка возникает в комплексе многократно. Группировка пучка — критически важный момент с точки зрения опасности увеличения продольного эмиттанса и потерь пучка. Проведенное численное моделирование режимов адиабатической группировки и эксперименты на нуклотроне на ионах дейтерия дали возможность создать и оптимизировать комплекс аппаратуры, обеспечивающий эффективность захвата, близкую к 100 %, как с сохранением кратности гармонических ВЧ-систем, так и с ее изменением.

NICA complex includes two synchrotrons — booster and Nuclotron serving to accelerate particles to energies of the experiment and Collider. Heavy-ion NICA program is designed for experiments with ions up to Au^{+79} . Another program includes experiments with polarized protons and ions of deuterium. The necessity of grouping of coasting beam in synchrotrons and collider occurs multiple times. The grouping of the beam is a critical point in terms of the danger of increasing the longitudinal emittance and beam losses. Numerical simulations of various modes of adiabatic grouping were fulfilled and experiments at Nuclotron with deuterium ions were held to simulate scenarios of beam behaviour in NICA. It made it possible to create and optimize a set of equipment for beam grouping ensuring the capture efficiency close to 100 % both with preservation of harmonics of RF stations and with its change.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db; 29.27.Eg

ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ создается новый ускорительно-коллайдерный комплекс NICA, включающий следующие установки: линейный ускоритель тяжелых ионов (НИЛас), существующий линейный ускоритель ЛУ-20, сверхпроводящий бустерный синхротрон, модернизированный ускоритель нуклотрон, который будет ускорять ионы до энергии эксперимента как

¹E-mail: aeliseev@jinr.ru

на выведенных в экспериментальную зону пучках, так и в коллайдере [1]. Коллайдер обеспечивает столкновение встречных пучков в двух точках, где разместятся физические установки MPD и SPD. Работа комплекса включает в себя эксперименты с тяжелыми ионами, вплоть до золота, и эксперименты на поляризованных дейтронах. При работе с тяжелыми ионами предполагается использовать инжекционную цепочку, состоящую из линейного ускорителя NPLас, бустера и нуклотрона. При экспериментах с легкими ионами и поляризованными пучками инжекция будет производиться из ЛУ-20 непосредственно в нуклотрон. ВЧ-гимнастика пучка будет осуществляться в бустерном синхротроне и коллайдере. Основные этапы манипуляций с пучком в режимах работы с тяжелыми ионами и поляризованными частицами приведены в таблице.

Гимнастика пучка в виде его адиабатической группировки (АГ) как на поле инжекции, так и при остановке ускорения на промежуточном постоянном магнитном поле

Состав инжекционных цепочек и трансформации пучка при реализации программ работы комплекса NICA (с тяжелыми ионами и поляризованными частицами)

Программа работы с тяжелыми ионами (на примере ионов Au^{+31} , Au^{+79}), источник KRION-N	Программа работы с поляризованными пучками (протоны, дейтроны), источник SPI
<i>Линейный ускоритель NPLас:</i> ускорение до энергии 3,2 МэВ/нуклон	<i>RFQ — форинжектор + линейный ускоритель LU-20:</i> ускорение до энергии 5 МэВ/нуклон (дейтроны), 20 МэВ/нуклон (протоны)
<i>Бустер:</i> накопление частиц в поперечном фазовом пространстве при помощи нескольких однооборотных инжекций. Адиабатическая группировка пучка. Ускорение пяти ступок Au^{+31} до энергии 65 МэВ/нуклон. Разгруппирование и электронное охлаждение. Адиабатический захват в первую гармонику ВЧ и ускорение ступка до энергии 576 МэВ/нуклон. Перевод пучка в нуклотрон с «обдиркой» ионов на фольге в канале бустер–нуклотрон	<i>Нуклотрон:</i> адиабатическая группировка пучка в пятую гармонику частоты обращения и ускорение до промежуточной энергии (значение в процессе выбора). Разгруппирование пучка и адиабатический захват в первую кратность частоты обращения. Ускорение ступка до энергии эксперимента в коллайдере
<i>Нуклотрон:</i> ускорение ступка Au^{+79} до энергии эксперимента в коллайдере (1–4,5 ГэВ/нуклон)	<i>Коллайдер:</i> режимы работы коллайдера с поляризованными частицами находятся в процессе проектирования
<i>Коллайдер:</i> Накопление частиц в барьерной ВЧ-системе. Адиабатическое формирование 22 ступок в гармонической ВЧ-2. Перехват пучка в гармоническую систему ВЧ-3 — кратность 66. Все этапы сопровождаются стохастическим или (и) электронным охлаждением	

для проведения необходимых действий требуется многократно при всех режимах работы комплекса NICA. Эффективный, без потерь частиц, захват пучка на постоянных полях магнитного поля и перевод его в ускорение критически важен для минимизации времени накопления требуемого количества ионов в коллайдере. Существующий ускоритель нуклотрон покрывает весь энергетический спектр работы коллайдерного комплекса и может быть использован для экспериментального моделирования его режимов и совершенствования методики АГ и аппаратных решений для ее реализации. Эксперименты с захватом пучка в нуклотроне имеют большое значение и для текущей программы ускорителя с ожидаемым результатом в виде

- упрощения настройки ускорителя;
- увеличения интенсивности пучка;
- возможности работы на нескольких пользователях (физических установок) на разных энергиях одновременно в течение одного цикла ускорения.

1. РАЗВИТИЕ АППАРАТНОЙ БАЗЫ

В настоящее время в нуклотроне в качестве основного штатного используется режим инжекции пучка в растущее магнитное поле при постоянном напряжении на ВЧ-станциях. Одновременно, в течение нескольких последних лет, осуществляется постепенный переход на новый базовый режим с инжекцией частиц в постоянное магнитное поле с их последующей адиабатической группировкой (рис. 1). Для моделирования гимнастики пучка в режимах проекта NICA на нуклотроне были проведены разнообразные

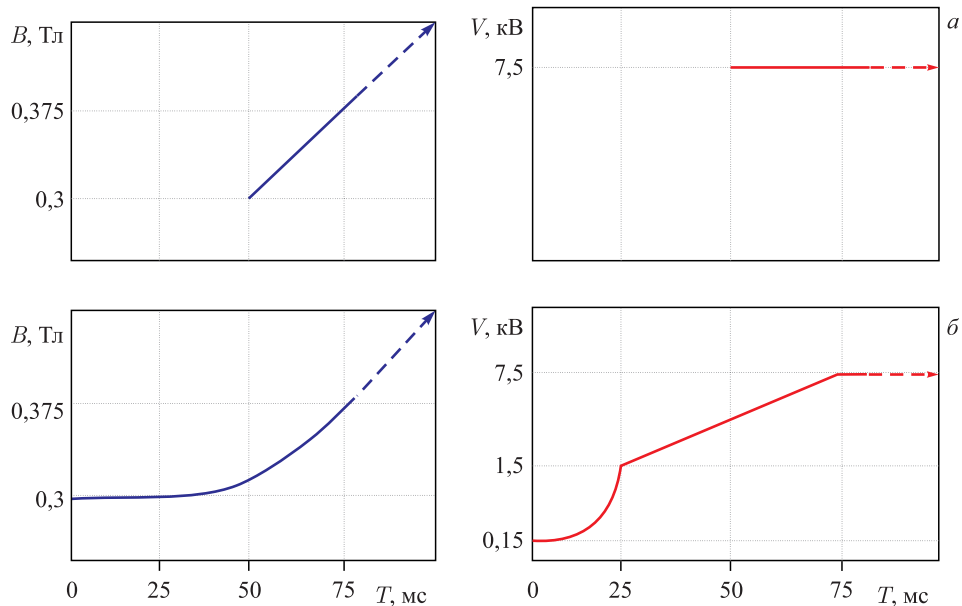


Рис. 1. Графики изменения магнитного поля и напряжения на ВЧ-станциях при инжекции в растущее магнитное поле (а) и в постоянное магнитное поле с последующим адиабатическим захватом (б)

эксперименты. Пучок из линейного ускорителя инжектировался в постоянное магнитное поле нуклотрона, адиабатически группировался и переводился в режим ускорения. Также были осуществлены режимы с выводом пучка на промежуточное магнитное поле, его разгруппированием и повторным группированием как без изменения кратности ВЧ, так и с изменением кратности, переводом к ускорению и выходу на более высокое магнитное поле.

Блок-схема системы управления ВЧ при инжекции пучка в растущее магнитное поле показана на рис. 2. Усилительный тракт принимает сигнал, сформированный после интегратора производной магнитного поля (В-серии). Усиленный сигнал подается на четвертьволновый резонатор, нагруженный ферритами, частота которого управляется током обмотки подмагничивания ферритовых колец. Сигнал с выхода резонатора поступает на блок регулировки усиления (АРУ), поддерживающий заданную амплитуду ВЧ. Частота резонатора поддерживается второй петлей обратной связи путем сравнения фазы напряжения на выходе и входе резонатора (АПЧ).

Переход к режиму управления радиочастотой с адиабатическим захватом требует внесения изменений в систему управления ускорительными станциями. Манипуляции с ускоряющим напряжением в широких пределах (100 В – 8 кВ), сопровождаемые изменением соотношения сигнал/шум, требуют дополнительной защиты аппаратуры от шумов. Реализация режима так называемого перезахвата (работа на промежуточном столе магнитного поля) предполагает полное выключение ускоряющего напряжения. Вследствие этого происходит потеря слежения за частотой системой АПЧ. В целом для работы в режиме АГ на поле инжекции и промежуточном поле были добавлены три новых подсистемы:

1. Программатор управления радиочастотой, программирующий огибающую амплитуды ВЧ и задающий импульсы включения-выключения и импульс подмагничивания ферритов.
2. Двухканальный 12-разрядный ЦАП (LCard E20-10), предназначенный для обработки команд, полученных от программатора.
3. Блок синхронизации сигналов (дешифратор), служащий для формирования импульсов управления.

Блок-схема модернизированной системы управления ВЧ с возможностью АГ представлена на рис. 3.

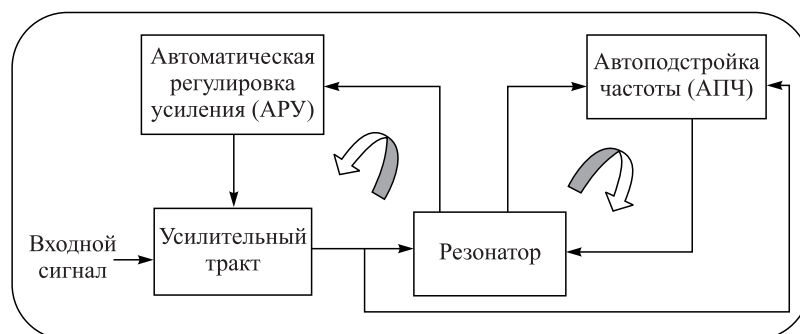


Рис. 2. Блок-схема штатной системы управления ВЧ. Инжекция в растущее магнитное поле

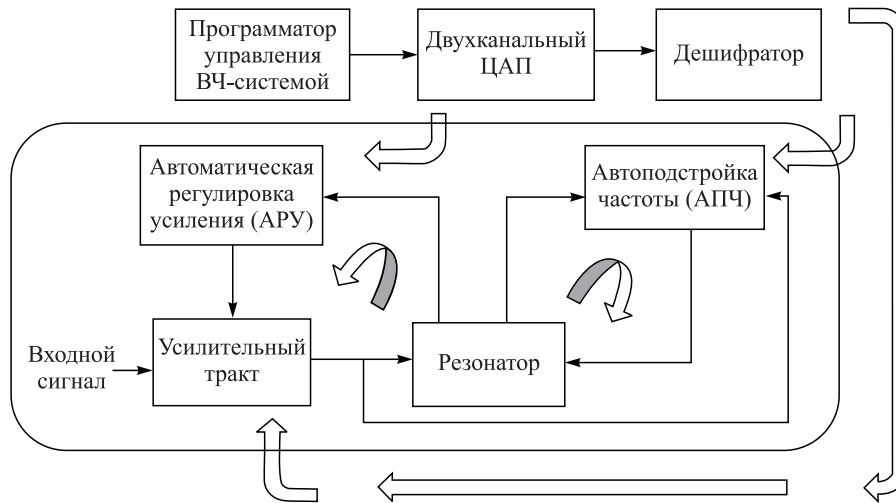


Рис. 3. Блок-схема модернизированной системы управления ВЧ

Управление амплитудой ускоряющего напряжения происходит по программе, которая записывается в ЦАП. На промежуточном столе магнитного поля усилительный тракт запирается. Для повторной группировки пучка работоспособность системы восстанавливается путем подачи напряжения на вход системы управления частотой таким образом, чтобы ток подмагничивания ферритов соответствовал требуемой частоте. При этом система автоподстройки частоты захватывает слежение. Затем происходит отпирание усилительного тракта, и амплитуда ВЧ продолжает изменение согласно программе. На рис. 4 показаны основные управляющие импульсы и огибающая амплитуды радиочастоты относительно изменения магнитного поля.

На схеме представлены:

- импульсы включения/выключения, дающие разрешение на начало и окончание подачи напряжения;
- импульс выключения на «столе» магнитного поля, служащий для полного записания ВЧ-станции с целью устранения ее воздействия на пучок. В блоке дешифриро-

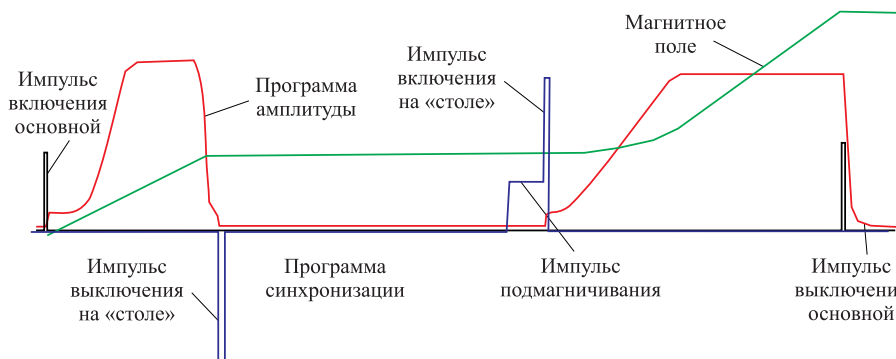


Рис. 4. Программа изменения амплитуды ВЧ и положение основных управляющих импульсов относительно магнитного поля

вания этот импульс отделяется, инвертируется и складывается с основным импульсом выключения;

— импульс подмагничивания. Подается непосредственно на вход управления частотой;

— импульс включения на столе магнитного поля. В блоке дешифрирования отделяется и складывается с основным отпирающим импульсом.

Реализация новой системы управления ВЧ столкнулась со следующими проблемами:

1) Для подсистемы АРУ ускоряющего напряжения: работа в условиях глубоких манипуляций напряжением ВЧ (от 100 В до 8 кВ) сопровождается критическим уменьшением отношения сигнал/шум на начальных этапах АГ. Для решения этой задачи диапазон изменения сигнала по амплитуде был разбит на несколько поддиапазонов с разными каналами пропускания сигнала.

2) Для подсистемы АПЧ резонаторов: для исключения воздействия ВЧ-станций на циркулирующий, разгруппированный пучок требуется осуществить полное выключение ускоряющего напряжения, приводящее к потере слежения системой АПЧ. В качестве решения была реализована система программного управления перестройкой резонатора.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА НУКЛОТРОНЕ

В течение последних сеансов нуклотрона (2014–2015 гг.) [3, 4] были проведены следующие эксперименты:

1) Адиабатический захват на столе инъекции. Режим планируется к применению в нуклотроне при работе с поляризованными пучками. Предполагается в качестве основного в бустере, а также будет использован для группировки пучка тяжелых ионов в коллайдере.

2) Распускание пучка на промежуточном столе с повторной группировкой. Режим является реализацией текущей программы исследований на нуклотроне (работа с двумя пользователями: на промежуточном столе — внутренняя мишень, на конечном столе — медленный вывод пучка на внешнюю мишень).

3) Распускание пучка и его повторная группировка на первой кратности частоты обращения. Режим моделирует работу бустера в программе с тяжелыми ионами и работу с поляризованными пучками в нуклотроне.

2.1. Адиабатический захват на поле инъекции. Многочисленные симуляции различных вариантов адиабатического захвата были проведены с помощью программы ESME [2, 5]. На рис. 5 приведен результат одного из моделирований. Начальное распределение с $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-4}$ соответствует измеренным параметрам нуклотрона. Начальное напряжение 155 В, конечное напряжение 2,3 кВ. Следует отметить, что ВЧ-система нуклотрона представляет собой систему ускоряющих зазоров с коэффициентом пересчета на резонатор — 0,651 (для моделирования: начальное напряжение — 100 В, конечное — 1,5 кВ). При напряжении в 2,3 кВ (реальное напряжение нуклотрона) акцептанс ускорителя превышает эмиттанс (6σ) в 3,3 раза. Линейное увеличение амплитуды ВЧ на параболическом переходе к линейному росту магнитного поля до 7,5 кВ (рис. 1) позволяет теоретически сохранить это соотношение.

Для успешного экспериментального осуществления адиабатической группировки требуется реализовать следующую последовательность действий:

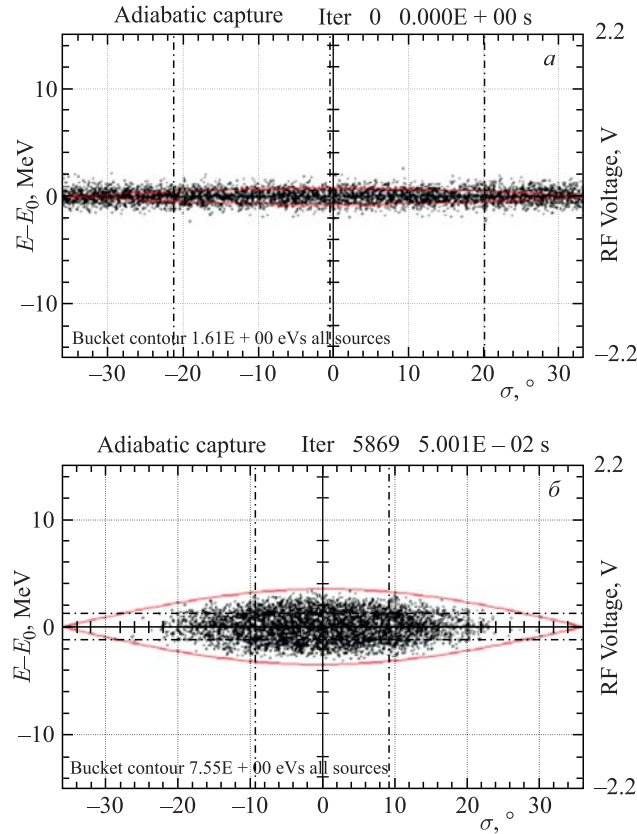


Рис. 5. Распределение частиц в фазовом пространстве энергия–азимут. В начале адиабатического захвата (рис. *a*, напряжение ВЧ — 100 В) и в конце (рис. *б*, напряжение ВЧ — 1,5 кВ)

- выбрать оптимальную рабочую точку;
- добиться фиксации рабочей точки при переходе к ускорению;
- осуществить оптимальный, в конкретной ситуации, выбор закона изменения амплитуды;
- синхронизовать работу линейного ускорителя и ВЧ-станций с циклом изменения поля.

В результате была достигнута интенсивность захваченного в ускорение пучка на уровне $2,5\text{--}3,5 \cdot 10^{10}$, что соответствует лучшим результатам, достигнутым при осуществлении инжекции в растущее магнитное поле (рис. 6). Потери при переходе к ускорению достигали 40–50 %. Подобный результат объясняется отсутствием возможности прецизионных измерений частоты бетатронных колебаний (Q-метра) и отсутствием источника разбаланса для токов, заводимых в линзы D и F. Равенство токов в фокусирующих и дефокусирующих линзах нуклотрона существенно ограничивало возможности настройки ускорителя. Ввод в эксплуатацию Q-метра и источника разбаланса в линзах планируется осуществить перед следующим 52-м сеансом нуклотрона.

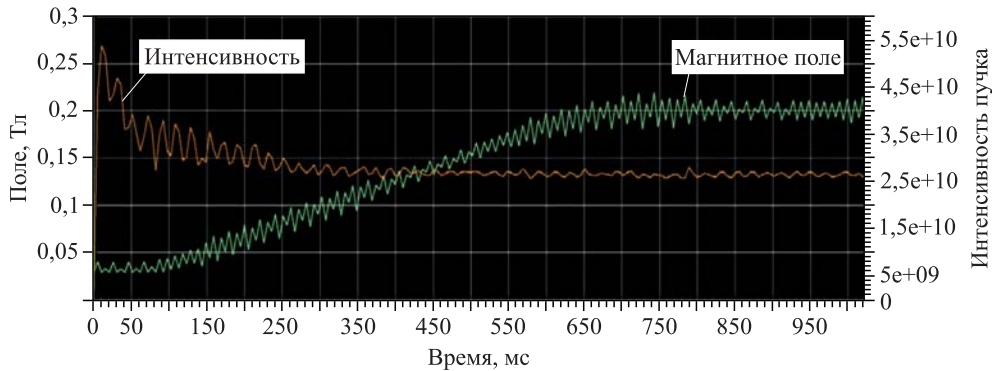


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Адиабатический захват на поле инжекции. Оранжевая кривая — интенсивность; зеленая кривая — магнитное поле

2.2. Перезахват на промежуточном столе магнитного поля. В течение нескольких последних сеансов нуклотрона была проведена серия экспериментов по перезахвату пучка на промежуточном столе магнитного поля (рис. 7).

В процессе экспериментов инжекция осуществлялась как в растущее магнитное поле, так и на стол инжекции с адиабатической группировкой. Пучок ускорялся до промежуточного стола магнитного поля. Для предотвращения увеличения эмиттанса пучка амплитуда ВЧ на столе уменьшалась до 0 за 150 мс. Учитывая, что частота синхротронных колебаний при напряжении ВЧ в 150 В (здесь и далее — реальное напряжение на ВЧ-станциях нуклотрона) составляет 240 Гц, а при 5 кВ — 1,8 кГц, время спада амплитуды в 150 мс заведомо достаточно для соблюдения адиабатичности процесса. Пучок свободно циркулировал в вакуумной камере на протяжении времени от 100 мс до 1 с. Далее осуществлялось включение ВЧ, пучок группировался на столе магнитного поля, для чего амплитуда ускоряющего напряжения изменялась по параболе с 0 до 3–5 кВ. Переход к линейному росту поля сопровождался линейным изменением амплитуды ВЧ до 7–8 кВ, что обеспечивало достаточный продольный аксептанс для удержания пучка в устойчивой зоне. В результате экспериментов был получен устойчивый перезахват с эффективностью, близкой к 100 %.

Более 160 ч (49-й сеанс) было отработано на физический эксперимент с двумя пользователями (рис. 8). На промежуточном столе пучок разбанчивался путем адиабатического сброса напряжения на ВЧ-станциях. В камеру ускорителя вводилась внутренняя мишень (ВМ), «аккумулирующая» часть пучка. Оставшиеся частицы адиабатически группировались и ускорялись до второго стола магнитного поля, где осуществлялся медленный вывод (МВ) для эксперимента второго пользователя.

Для эффективного перезахвата оставшихся в камере частиц пришлось переделать систему управления радиочастотой во время выключения ВЧ-станций на промежуточном столе поля. Схема управления радиочастотой действует на основе дискретного интегратора сигналов с датчика поля в измерительной секции нуклотрона. Интегратор формирует так называемую В-серию. В процессе экспериментов выяснилось, что воздействие электромагнитных шумов на серии В⁺ и В⁻ различно. В результате во время длительного (сотни миллисекунд) выключения ВЧ-станций накапливается ошибка радиочастоты по отношению к полю, что приводит к смещению сепаратрисы относительно пучка, увели-

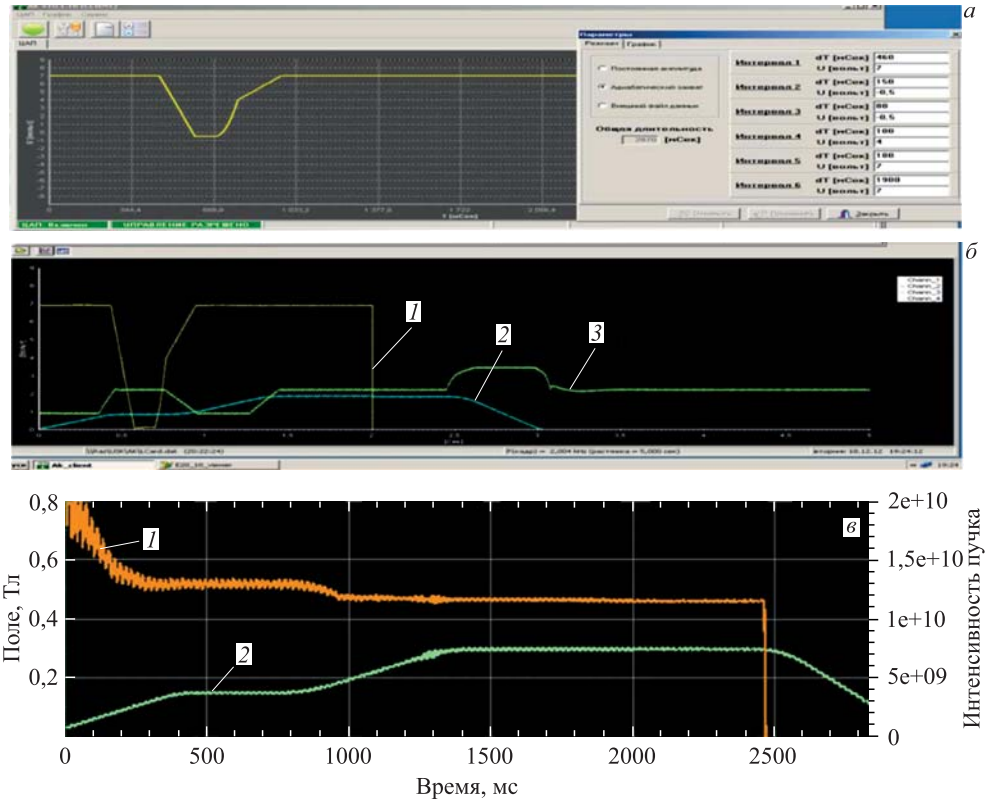


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Адиабатическая группировка на промежуточном столе магнитного поля (перезахват). а) Программная кривая изменения амплитуды ВЧ и таблица для ее формирования. б) Отработанные сигналы: желтый (1) — отработанная амплитуда ВЧ; голубой (2) — магнитное поле; зеленый (3) — производная магнитного поля. в) Оранжевый (1) — интенсивность пучка (сигнал с интегрального датчика тока пучка); зеленый (2) — магнитное поле

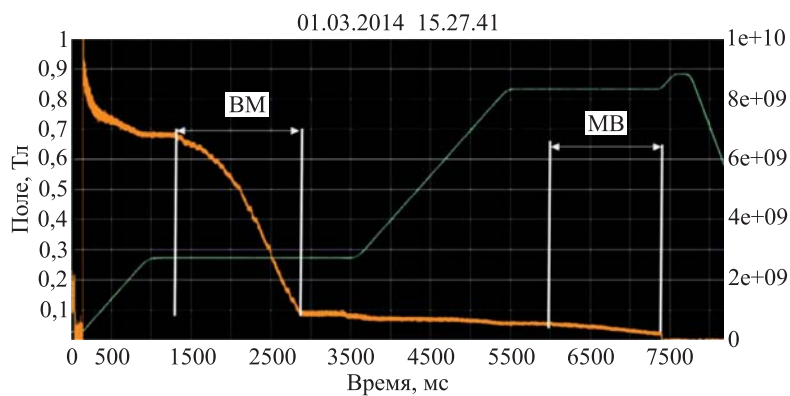


Рис. 8. Зависимости магнитного поля и интенсивности циркулирующего пучка от времени при работе в режиме с двумя пользователями. Адиабатический захват в конце первого стола. Частота ВЧ на столе «заморожена»

чению эмиттанса пучка при АГ и, как следствие, потерям частиц на параболе перехода магнитного поля к его линейному росту. Это обстоятельство потребовало «заморозить» радиочастоту путем отключения ее слежения за В-сериями на время выключения ВЧ-станций.

2.3. АГ на промежуточном столе поля (перезахват) в первую кратность радиочастоты. Особенность этого эксперимента заключается в том, что после повторного включения ВЧ-станций на промежуточном столе поля кратность радиочастоты изменялась с пятой на первую. Диапазон работы ускорительных станций нуклотрона — от 600 кГц до 6 МГц. Поэтому режим перезахвата в первую кратность возможен в определенных пределах значений магнитного поля, а именно, с ~ 1680 до 20000 Гс (максимума). Для примера: на поле инжекции в 292 Гс на пятой кратности частота составляет 608,6 кГц, такая же частота при первой кратности достигается на поле 1689 Гс. Опасность уменьшения кратности состоит в уменьшении суммарного продольного акцептанса ускорителя. И действительно, суммарная площадь акцептанса A имеет следующую зависимость:

$$A \sim \sqrt{V}/h,$$

где V — напряжение на ускорительных станциях, а h — кратность частоты. В связи с этим, для сохранения продольного акцептанса ускорителя, при изменении кратности с пятой на первую необходимо увеличить ускоряющее напряжение в $\sqrt{5}$ раз. Однако если запас по акцептансу достаточен, то потерь частиц можно избежать. Для нуклотрона на поле 1700 Гс при напряжении на станциях 16 кВ на первой кратности площадь продольного акцептанса составляет 4,7 эВ, эмиттанс (6σ) свободно циркулирующего пучка с $\pm 2\sigma$ равен $\pm 5 \cdot 10^{-4} - 0,22$ эВ · с. Проведенные эксперименты по перезахвату в первой кратности показали результаты, аналогичные перезахвату без изменения кратности с эффективностью свыше 90 %.

ВЫВОДЫ

- Изготовлены, внедрены и опробованы в работе программно-аппаратные средства для осуществления адиабатической группировки пучка на нуклотроне.
- Проведены исследования режима работы ВЧ-системы бустера проекта NICA с разгруппированием пучка и последующей повторной группировкой на другой кратности ускоряющей системы.
 - 160 ч отработано в режиме с двумя пользователями (49-й сеанс нуклотрона).
 - Эффективность группирования пучка на полях магнитного поля свыше 1500 Гс — до 96 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Part. Nucl. 2012. V. 9, No. 4–5(174–175). P. 521–526.
2. *Волков В. И. и др.* Моделирование адиабатического захвата пучка нуклотрона в режим ускорения. Препринт ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003. 12 с.
3. *Аверишев А. С. и др.* Итоги 44-го и 45-го сеансов нуклотрона. Препринт ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012. С. 14–15.
4. *Аверишев А. С. и др.* Итоги 46-го и 47-го сеансов нуклотрона. Препринт ОИЯИ Р9-2013-140. Дубна, 2013. С. 22–25.
5. www-ap.fnal.gov/ESME